

На правах рукописи

Ю.Ф.

ПАНЧЕНКО ЮЛИЯ ФЕДОРОВНА

**КОМПОЗИЦИОННЫЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ
ДЕКОРАТИВНОЙ ОТДЕЛКИ ПОМЕЩЕНИЙ**

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО "Тюменский индустриальный университет"
на кафедре "Строительные материалы"

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Зимакова Галина Александровна

Официальные оппоненты: **Соков Виктор Николаевич**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технологии вяжущих
веществ и бетонов»,
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский Московский
государственный строительный университет»

Баканов Максим Олегович
кандидат технических наук,
начальник кафедры «Пожарной тактики и
основ аварийно-спасательных и других
неотложных работ»,
ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-
спасательная академия ГПС МЧС России»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева»

Защита состоится 14 июня 2019 г. в 14.00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский
государственный политехнический университет» по адресу: 153000, г. Иваново,
Шереметевский проспект., д. 21, ауд. У-109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО
«Ивановский государственный политехнический университет»
(www.ivgpu.com).

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Н.В. Заянчуковская

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. С введением в действие более жестких нормативов по термическому сопротивлению ограждающих конструкций, интерес к производству новых высокоэффективных теплоизоляционных материалов возрос. Кроме стеновых материалов с низкой теплопроводностью, таких, как пенно- и газобетоны, газосиликаты, керамзитобетон низкой плотности, полистиролбетон, пеностекло, пенокерамика, пено- и газокерамобетон, все большее применение в строительстве находят теплоизоляционные материалы в виде тонкослойных покрытий. Данные материалы представляют собой покрытия белого цвета, включающие связующее, полые микросферы различной природы (полимерные, стеклянные, силиконовые) и титановый пигмент. Они имеют матовую, пористую поверхность, что в совокупности с белым цветом приводит к их очень быстрому загрязнению и потере внешнего вида. До 90% объема в данных композициях занимают полимерные или стеклянные микросферы, которые вследствие применения дорогостоящего сырья и сложности технологии изготовления, имеют высокую стоимость.

Поэтому представляются актуальными исследования в области разработки композиционного теплоизоляционного материала с применением более дешевого микросферического наполнителя – полых алюмосиликатных микросфер, с одновременным решением вопросов по повышению его декоративной выразительности и стойкости к загрязнению за счет введения в состав алюминиевого пигмента. Частицы алюминиевого пигмента имеют чешуйчатую и пластинчатую форму, ориентируются параллельно поверхности композиционного материала, тем самым увеличивая путь агрессивных и загрязняющих веществ вглубь покрытия.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами разработки высокоэффективных теплоизоляционных материалов, путем создания пористых структур занимаются ученые Ю.М. Баженов, В.Т. Ерофеев, Е.В. Королев, Ю.В. Пухаренко, В.Н. Соков, С.В. Федосов. Теоретические основы формирования структур наполненных полимерных композиционных материалов рассмотрены в работах А.Н. Бобрышева, В.Т. Ерофеева, Ю.Г. Иващенко, В.Ф. Строганова, Б. Мюллера. Труды Д.В. Орешкина и Е.В. Королева по применению полых микросфер в высокопрочных легких бетонах, тампонажных и кладочных растворах подтверждают их эффективность в качестве легкого наполнителя. Большой интерес представляют исследования способов определения теплофизических характеристик теплоизоляционных материалов и конструкций, рассмотренные в работах М.О. Баканова и В.Г. Котлова.

Вопросами разработки и исследования свойств тонкослойных композиционных теплоизоляционных покрытий занимаются В.П. Селяев и Т.А. Низина в Мордовском государственном университете им. Н.П. Огарева.

Однако на сегодняшний день вопросы применения полых алюмосиликатных микросфер в качестве наполнителя в композиционных

теплоизоляционных материалах и их влияния на свойства тонкослойных покрытий изучены не достаточно. Нет данных о совместном применении в составе композиционных теплоизоляционных материалах полых алюмосиликатных микросфер и алюминиевого пигмента для повышения декоративной привлекательности покрытий на их основе.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка и исследование свойств композиционного теплоизоляционного материала для декоративной отделки наружных стен в помещениях жилых и общественных зданий.

Для достижения цели поставлены следующие задачи.

1. На основании анализа литературных данных обосновать целесообразность совместного применения в составе композиционного теплоизоляционного материала низко теплопроводного наполнителя – полых алюмосиликатных микросфер и декоративного компонента – алюминиевого пигмента.

2. Исследовать возможность получения композиционного теплоизоляционного материала на основе полых алюмосиликатных микросфер, алюминиевого пигмента и водной дисперсии полимера, обладающего комплексом необходимых технологических и эксплуатационных характеристик.

3. Установить количественные зависимости изменения свойств композиционного теплоизоляционного материала от состава. На основании полученных зависимостей, определить критическую объемную концентрацию пигментов и наполнителей (КОКП).

4. Оптимизировать состав композиционного теплоизоляционного материала с позиции получения наилучших теплоизоляционных и декоративных характеристик.

5. Провести оценку экономической и теплотехнической эффективности разработанного композиционного теплоизоляционного материала по сравнению с существующими аналогами.

Научная новизна исследования. Основные результаты, полученные автором и составляющие новизну диссертации, заключаются в следующем:

- обоснована возможность получения композиционного материала обладающего как теплоизоляционными, так и декоративными свойствами, путем комплексного использования низко теплопроводного наполнителя – полых алюмосиликатных микросфер и декоративного компонента – алюминиевого пигмента;

- выявлены закономерности формирования структуры и свойств композиционного теплоизоляционного материала на основе полых алюмосиликатных микросфер и алюминиевого пигмента;

- установлены количественные зависимости изменения технологических и эксплуатационных свойств композиционного теплоизоляционного материала от состава; определена критическая объемная концентрация пигментов и наполнителей;

- разработаны многофакторные математические модели, позволяющие оптимизировать состав композиционного теплоизоляционного материала по коэффициенту теплопроводности и степени блеска покрытия на его основе;

- показано, что частицы алюминиевого пигмента в композиционном теплоизоляционном покрытии располагаются параллельно поверхности и, за счет пластинчатой формы и ровных краев, увеличивают стойкость покрытия к загрязнению.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в установлении закономерностей комплексного влияния компонентов композиционного теплоизоляционного материала на его теплоизоляционные характеристики и декоративные свойства. На основании метода критической объемной концентрации пигментов и наполнителей изучено влияние состава композиционного теплоизоляционного материала на его технологические и эксплуатационные свойства. Проведен комплексный анализ особенностей структуры и свойств композиционного теплоизоляционного материала.

Практическая значимость заключается в:

- разработке эффективного состава композиционного теплоизоляционного материала с коэффициентом теплопроводности $\lambda=0,065-0,068$ Вт/м·К, адгезией к бетонной поверхности 0,88 МПа, коэффициентом паропроницаемости 0,012, мг/(м·ч·Па) и степенью блеска 37-38 единиц;

- использовании в качестве наполнителя полых алюмосиликатных микросфер, выделяемых из золошлаковых отходов от сжигания угля топливных электростанций и имеющих стоимость в 8 – 10 раз ниже традиционно применяемых стеклянных или полимерных микросфер;

- применении в качестве декоративного компонента алюминиевого пигмента, за счет чего достигается не только высокий художественно-декоративный эффект, но и значительно увеличивается стойкость покрытия к загрязнению.

Предмет исследования – влияние состава композиционного теплоизоляционного материала для внутренней отделки помещений на его технологические и эксплуатационные свойства.

Методология и методы исследования

Теоретические исследования основаны на анализе и систематизации научно-технической литературы. Экспериментальные исследования выполнены с применением методов математического планирования эксперимента и статистической оценки достоверности. Обработка результатов экспериментов осуществлялась с использованием систем автоматизированного проектирования Mathcad и Excel. Исследования физико-механических характеристик осуществлялись по действующим нормативным документам с использованием современного лабораторного оборудования. Для исследования процессов структурообразования применялся метод растровой электронной микроскопии.

Положения, выносимые на защиту:

- закономерности формирования структуры и свойств композиционного теплоизоляционного материала на основе полых алюмосиликатных микросфер и алюминиевого пигмента;
- математические модели, позволяющие прогнозировать теплотехнические и декоративные свойства композиционного теплоизоляционного материала на основе стирол-акриловой дисперсии, алюмосиликатных микросфер и алюминиевого пигмента;
- данные подтверждающие более высокую стойкость покрытия на основе композиционного теплоизоляционного материала к загрязнению, что обусловлено наличием в составе алюминиевого пигмента, имеющего частицы в форме пластинок.

Степень достоверности и апробация результатов исследований

Достоверность результатов научных исследований и выводов подтверждена большим объемом экспериментальных данных, полученных в лабораторных и натуральных условиях, и обработанных с помощью методов статистической оценки.

Отдельные результаты диссертационной работы докладывались: на 63-й научно-технической конференции (НГАСУ, г. Новосибирск); на X Юбилейной международной научно-технической конференции «Проблемы строительного комплекса России» (УГНТУ, г. Уфа); на Всероссийской научно-практической конференции «Строительное материаловедение сегодня: актуальные проблемы и перспективы развития» (ЮУрГУ, г. Челябинск); на научно-практических конференциях 2005–2011 г. (ТюмГАСУ, г. Тюмень); на Международной научной конференции «Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы» (Томск, 2017).

Результаты исследований внедрены:

- при строительстве Административно-торгового комплекса по ул. Харьковская – Одесская, г. Тюмень;
- в Тюменском индустриальном университете (ТИУ) при выполнении лабораторных работ по курсам «Неразрушающие методы исследования строительных материалов» и «Технология звуко- и теплоизоляционных материалов»;
- при строительстве объекта «Совмещенная малоэтажная застройка п. Винзили Тюменского района, ул. 60 лет Октября».

Публикации. По материалам исследований опубликовано двенадцать работ, в том числе четыре в изданиях, входящих в перечень ВАК и один патент на полезную модель. Результаты работы представлены в отчете о научно-исследовательской работе по контракту АОМП-169/9 от 01.06.09 на тему «Разработка теплоотражающих покрытий для обеспечения ресурсосбережения при эксплуатации зданий» по заказу министерства образования РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы. Работа изложена на 142 страницах машинописного текста и включает 36 рисунков и 37 таблиц. Библиографический список включает 168 наименований.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с паспортом специальности 05.23.05 п. 2 «Создание новых строительных материалов, обеспечивающих строительство быстровозводимых, трансформируемых и долговечных зданий и сооружений», п. 7 «Разработка составов и принципов производства эффективных строительных материалов с использованием местного сырья и отходов промышленности», п. 11 «Разработка материалов и технологий для реконструкции и санации зданий и сооружений».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, показана новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы современные тенденции разработки теплоизоляционных материалов, в том числе и тонкослойных композиционных теплоизоляционных покрытий.

В настоящее время на российском рынке предлагается огромное количество композиционных материалов, позиционируемых как теплоизоляционные покрытия под марками «Изолат», «Корунд», «Теплос-Топ», «Актерм», «Теплометт», «Теплокрас», «Магнитерм», «Раум Профи», «Альтермо», «Теплокор», «Тезолат», «Керамоизол» и др. Из зарубежных материалов наиболее популярным является жидкое теплоизоляционное покрытие «Thermal-Coat™». Данные материалы представляют собой покрытия белого цвета, включающие связующее, полые микросферы различной природы (полимерные, стеклянные, силиконовые) и титановый пигмент.

Данные теплоизоляционные покрытия имеют матовую, пористую поверхность, что в совокупности с белым цветом приводит к очень быстрому их загрязнению и потере внешнего вида. Чешуйчатые и пластинчатые пигменты повышают стойкость к загрязнению, так как увеличивают путь агрессивных и загрязняющих веществ вглубь покрытия. Предлагаемая пигментная паста содержит частицы алюминия, имеющие плоскую округлую форму с ровными краями. Ориентируясь параллельно поверхности, данные частицы не только увеличивают степень блеска покрытия, но и позволяют получить ровную гладкую поверхность стойкую к загрязнению.

Традиционно применяемые в составе композиционных теплоизоляционных материалов стеклянные и полимерные микросферы имеют достаточно высокую стоимость. Путем применения в качестве низко теплопроводного наполнителя полых алюмосиликатных микросфер, стоимость которых в 8-10 раз ниже стеклянных или полимерных, достигается снижение стоимости композиционного теплоизоляционного материала.

На основании этого сформулирована **научная гипотеза диссертационного исследования:**

Совместное применение в составе композиционного теплоизоляционного материала полых алюмосиликатных микросфер и алюминиевого пигмента позволяет достичь требуемые теплоизоляционные характеристики, при одновременном снижении стоимости и повышении декоративной привлекательности покрытия на его основе.

Обоснован выбор в качестве связующего для композиционного теплоизоляционного материала водной дисперсии стирол-акрилового полимера вследствие не токсичности, хорошего соотношения цена/качество и возможности достижения высокой степени наполнения пигментами и наполнителями.

Во второй главе рассмотрены сырьевые материалы, применяемые в работе, и их характеристики. В качестве алюминиевого пигмента предложено использовать готовую к применению пигментную пасту фирмы Ecart серии Hydroxal DC 5000, представляющую собой водную дисперсию, содержащую 65% алюминиевого пигмента с частичками в форме «серебряный доллар». Частицы алюминия инкапсулированы слоем прозрачного диоксида кремния, что, в отличие от традиционно применяемых алюминиевых пудр ПАП-1 и ПАП-2, позволяет использовать их в качестве пигмента для водных композиций.

При производстве пигментированных составов имеет значение цвет наполнителя, который определяется характером поверхности, толщиной стенки микросферы и ее пористостью. Оболочка микросфер светло-серого цвета, имеет небольшое количество закрытых пор, поэтому они обладают достаточной прозрачностью, не изменяют цвет краски, повышают укрывистость и тем самым способствуют экономии дорогого пигмента. Другим важным параметром является степень полидисперсности частиц. С одной стороны, увеличение полидисперсности наполнителей не желательно вследствие снижения агрегативной устойчивости системы, с другой, – степень упаковки полидисперсных частиц значительно выше степени упаковки монодисперсных порошков. Алюмосиликатные микросферы фракции 75-300 имеют размах 1,0 и наиболее предпочтительны в качестве наполнителя для тонкослойного теплоизоляционного покрытия.

Описаны методы исследования дисперсного состава, структуры применяемых исходных компонентов и пленки композиционного теплоизоляционного покрытия, а также его физико-механических характеристик.

В третьей главе приведены данные по разработке состава композиционного теплоизоляционного материала на основе водной дисперсии полимера, алюмосиликатных микросфер и алюминиевого пигмента. Показано, что свойства композиционного теплоизоляционного материала напрямую зависят от его степени наполнения пигментом и наполнителем. Степень наполнения обозначается термином «объемная концентрация пигментов –

ОКП» (К) и определяется как отношение суммарного объема пигмента и наполнителя к общему объему отвержденной пленки. Важным критерием возможности наполнения композиционного материала является значение критической объемной концентрацией пигментов и наполнителей – КОКП. При КОКП достигается максимально плотная упаковка частиц пигмента и наполнителя, пространство между которыми заполнено пленкообразователем. В случае применения традиционных наполнителей, имеющих истинную плотность значительно выше, чем у полимера, это выражается в получении пленки с максимальной плотностью. Так как алюмосиликатные микросферы имеют истинную плотность ниже, чем у стирол-акрилового полимера, то даже при достижении максимально плотной степени упаковки, покрытие будет иметь плотность ниже плотности свободной пленки полимера. Поэтому в качестве критерия КОКП рассматривалась не плотность, а пористость покрытия, определяемая по отношению теоретической плотности, рассчитанной по методу абсолютных объемов и фактической плотности покрытия, определенной методом гидростатического взвешивания.

Так как КОКП стирол-акриловых водно-дисперсионных красок лежит в пределах от 40 до 80%, нахождение экстремума, при котором будет достигнута максимально плотная упаковка компонентов пленки, проводилось в данном диапазоне. Серии образцов готовились путем добавления к 100 г стирол-акриловой дисперсии увеличивающегося количества микросферического наполнителя от 10 до 80 г, с шагом 5 г. Так как при увеличении доли наполнителя происходит увеличение вязкости составов, регулирование консистенции до требуемой – 35 с по вискозиметру типа ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм осуществлялось путем добавления дистиллированной воды. При проведении эксперимента содержание алюминиевой пасты в составе композиции принято на одном уровне – 12 % по массе, которого визуально достаточно для равномерного окрашивания. Для определения плотности и пористости выбраны девять составов с увеличивающейся ОКП в диапазоне от 40 до 80 % (таблица 1).

Таблица 1

Составы композиции на 100 г

№ состава	Содержание компонента, г				ОКП, %
	Стирол-акриловая дисперсия (Д)	Алюмосиликатные микросферы (М)	Вода (В)	Алюминиевая паста (А)	
1	74	11	3	12	43
2	70	14	4	12	49
3	66	16	6	12	54
4	62	19	7	12	59
5	56	22	10	12	65
6	49	25	14	12	70
7	44	27	17	12	74
8	40	28	20	12	76
9	37	29	22	12	79

В результате эксперимента установлено, что минимальная пористость, а значит, максимально плотная упаковка компонентов пленки достигается при ОКП 59%, что и является критической степенью наполнения (КОПК) композиционного теплоизоляционного материала (рис. 1).

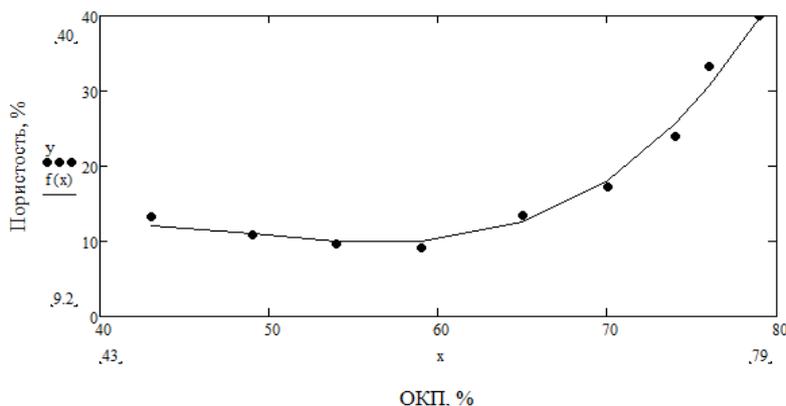


Рис. 1. Зависимость пористости покрытия от объемной концентрации пигментов и наполнителей

$$P_0 = 0,001395 \cdot K^3 - 0,207435 \cdot K^2 + 10,05 \cdot K - 147,4$$

При проверке адекватности и статистической значимости полученного уравнения регрессии последовательно проверены две гипотезы.

H₀-гипотеза: полученное уравнение регрессии статистически значимо (надёжно) в условиях существующей выборки (данных измерений).

H₁-гипотеза – проверяется, если в результате проверки гипотезы *H₀* последняя не была опровергнута, и состоит в том, что коэффициент аппроксимации статистически значим для имеющейся выборки.

Для проверки обеих гипотез использовался критерий Фишера или F-критерий. Для данного уравнения регрессии коэффициент детерминации $R^2 = 0,986$, значение $F_{\text{факт}} = 119,07$. Значение $F_{\text{табл}}$ для гипотезы *H₀* выбирается для параметров $k_1 = m = 3$, $k_2 = n - m - 1 = 5$ (при принятом $\alpha = 0,05$) из таблицы критических значений F-критерия: $F_{\text{табл}} = 5,41$. $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$. Таким образом, гипотеза *H₀* принимается и можно признать не случайными, а надежными связь параметров *K* и P_0 и статистическую значимость уравнения регрессии. Для гипотезы *H₁* значение $F_{\text{табл}}$ выбирается для параметров $k_1 = 1$ и $k_2 = n - 2 = 7$ (при заданном $\alpha = 0,05$) из таблицы критических значений F-критерия: $F_{\text{табл}} = 5,59$. Как и в случае гипотезы *H₀*, для гипотезы *H₁* $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$. Гипотеза *H₁* принимается и можно признать статистически значимым значение коэффициента аппроксимации (коэффициента детерминации) для данного уравнения регрессии.

Исследование структуры покрытия при различных ОКП (рис. 2) показывает, что при ОКП 43 % полимерная матрица имеет некоторое количество пор, тогда как при ОКП 54% пространство между микросферами полностью заполнено полимером, который не имеет пор. При ОКП пленки 65% наблюдается разрыхление структуры полимера вблизи частиц наполнителя, а при более высоких значениях ОКП полимер уже не образует сплошную матрицу.

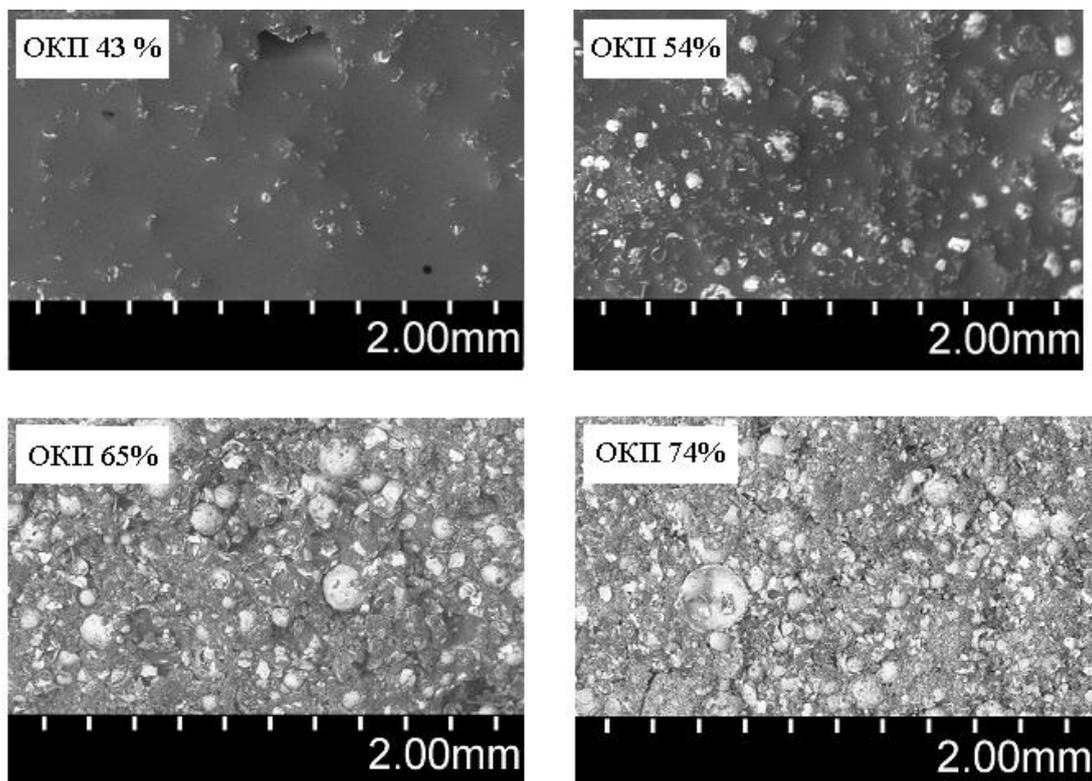


Рис. 2. Структура теплоизоляционного покрытия

Микроскопические исследования адгезионного слоя композиционного покрытия на поверхности керамического кирпича (рис. 3), подтверждают, что при степени наполнения значительно меньшей КОКП, полимерная матрица имеет поры, которые уменьшают площадь контакта связующего с подложкой. Оптимальная степень наполнения обеспечивает минимальную пористость полимерной матрицы, заполняющей пространство между частицами наполнителя и между наполнителем и подложкой, обеспечивая сплошной адгезионный слой.

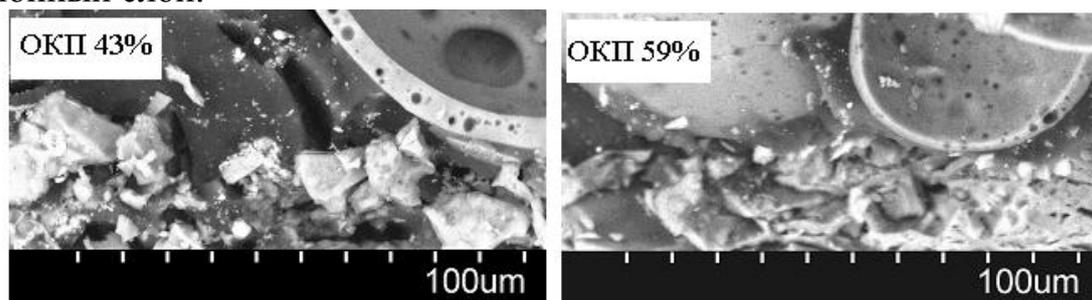


Рис. 3. Адгезионный слой теплоизоляционного покрытия на поверхности керамического кирпича

В работе установлены количественные зависимости изменения свойств композиционного теплоизоляционного покрытия от состава. Наиболее важными параметрами, характеризующими свойства композиционного теплоизоляционного материала для внутренних работ, являются укрывистость (D), адгезионная прочность (σ), паропроницаемость (μ). Данные свойства покрытия определяются как функции от ОКП. Установлено, что укрывистость сухой пленки, снижаясь, переходит через минимум и после достижения ОКП – 61 %, увеличивается (рис. 4). Это объясняется тем, что при превышении КОКП,

связующее не полностью заполняет пространство между частицами микросферического наполнителя, что приводит к их агрегатированию, образованию комков, неравномерному прокрашиванию и, как следствие, увеличению требуемой толщины пленки.

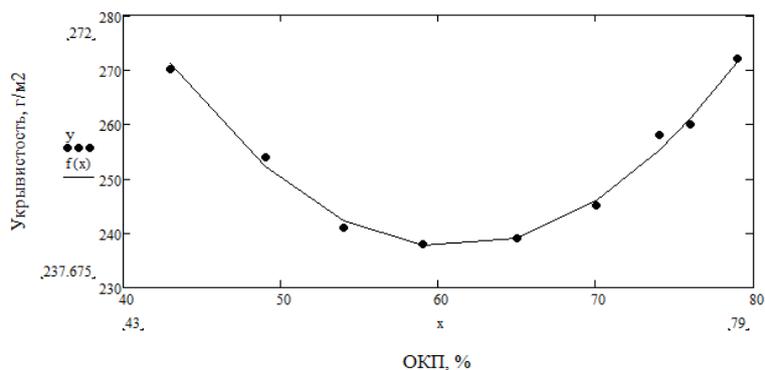


Рис. 4. Зависимость укрывистости композиционного теплоизоляционного покрытия от объемной концентрации пигментов и наполнителей
 $D=0,105 \cdot K^2 - 12,8 \cdot K + 627$

Адгезионная прочность увеличивается вплоть до достижения КОКП, а затем снижается (рис. 5). Это обусловлено тем, что при оптимальной степени наполнения покрытия, полимерная матрица образует сплошной адгезионный слой на поверхности подложки с минимальным количеством пор.

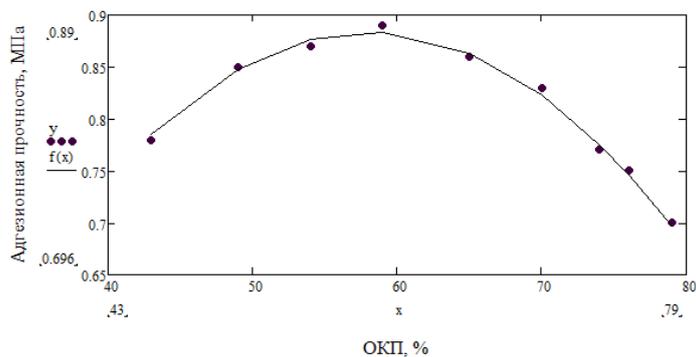


Рис. 5 – Зависимость адгезионной прочности композиционного теплоизоляционного покрытия от объемной концентрации пигментов и наполнителей
 $\sigma = -0,00043 \cdot K^2 + 0,05 \cdot K - 0,57$

Паропроницаемость материала зависит не только от общей пористости, но и от характера пор. Минимальная пористость достигается при ОКП покрытия 59%, а минимальная паропроницаемость соответствует степени наполнения 56% (рис. 6). Кроме того, зависимость изменения паропроницаемости от ОКП не повторяет зависимость изменения пористости. Это говорит о модификации структуры полимера, заполняющего пространство между зернами наполнителя при увеличении ОКП. До ОКП покрытия 56% паропроницаемость снижается более активно, чем общая пористость. После степени наполнения 56%, паропроницаемость увеличивается, хотя общая пористость продолжает снижаться до ОКП 59%. Это свидетельствует о

перераспределении пор в сторону увеличения доли капиллярных пор в данном диапазоне степени наполнения и о начале процессов разрыхления полимера вблизи частиц наполнителя.

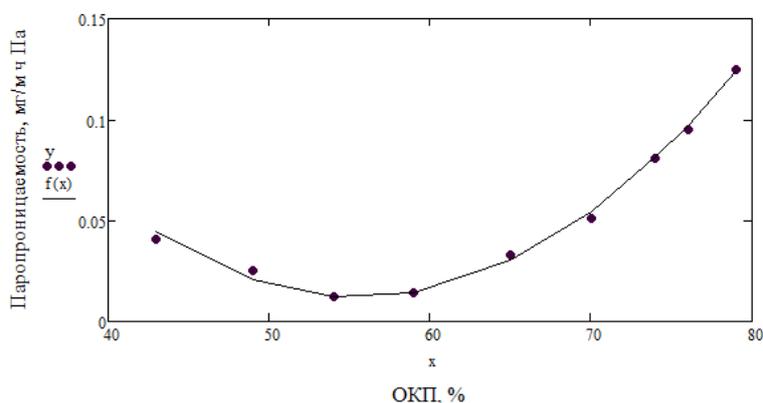


Рис. 6. Зависимость паропроницаемости композиционного теплоизоляционного покрытия от объемной концентрации пигментов и наполнителей

$$\mu = 0,000205 \cdot K^2 - 0,0228 \cdot K + 0,646$$

На основании количественных зависимостей свойств композиционного теплоизоляционного покрытия от состава можно сделать вывод, что наилучшие свойства пленки достигаются в диапазоне ОКП 54-62%.

Оптимизация состава покрытия в данном диапазоне степени наполнения выполнена по наиболее важным для теплоизоляционного материала для внутренней отделки помещений параметрам: коэффициенту теплопроводности (λ) и степени блеска (Б). На данные характеристики оказывает влияние как общая объемная концентрация пигментов и наполнителей, так и доля алюминиевой пигментной пасты. Матрица плана эксперимента представлена в таблице 2, результаты на рис. 7.

Таблица 2

Матрица плана эксперимента

№ состава	Варьируемые параметры в кодированных переменных		Варьируемые параметры в натуральном выражении	
	X ₁	X ₂	K, %	A, %
1	-1	-1	54	10
2	-1	0	54	15
3	-1	1	54	20
4	0	-1	58	10
5	0	0	58	15
6	0	1	58	20
7	1	-1	62	10
8	1	0	62	15
9	1	1	62	20

После обработки экспериментальных данных по методу наименьших квадратов получены математические зависимости для коэффициента теплопроводности и степени блеска композиционного теплоизоляционного покрытия от состава:

$$\lambda = -0,098 + 0,0051 \cdot K - 0,06 \cdot 10^{-3} \cdot K^2 + 0,045 \cdot A$$

$$B = -1026 + 36,8 \cdot K - 0,33 \cdot K^2 + 2,5 \cdot A$$

Проверка адекватности и статистической значимости полученных уравнений регрессии с помощью критерия Фишера позволяет признать не случайными, а надежными связь параметров К и А со степенью блеска и коэффициентом теплопроводности композиционного теплоизоляционного материала и статистическую значимость уравнений регрессии и коэффициентов аппроксимации.

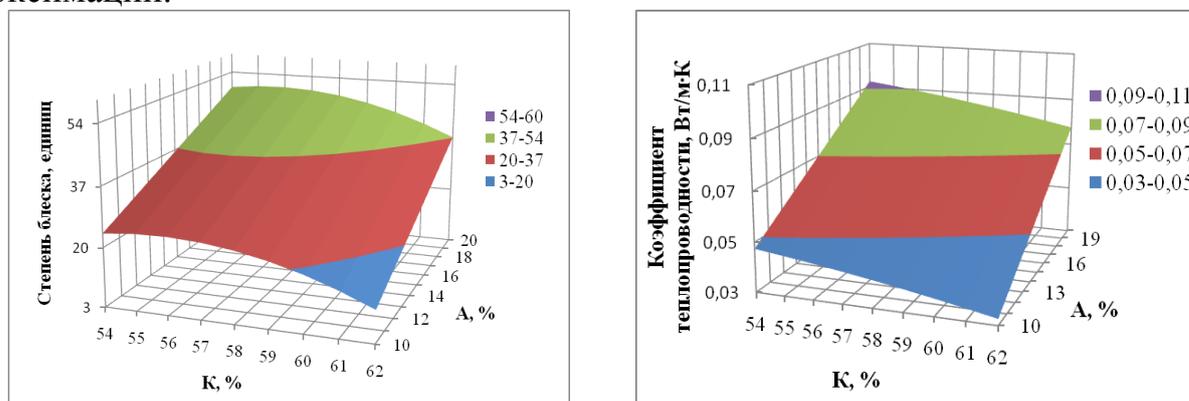


Рис. 7. Влияние степени наполнения и доли алюминиевой пигментной пасты на свойства композиционного теплоизоляционного материала

Анализируя зависимость коэффициента теплопроводности от состава, можно сделать вывод, что с увеличением доли алюминиевой пигментной пасты происходит повышение коэффициента теплопроводности. Объясняется это тем, что, во-первых, при сохранении общей степени наполнения увеличение доли алюминиевого пигмента влечет уменьшение количества низко теплопроводного наполнителя – алюмосиликатных микросфер в составе; во-вторых, алюминиевый пигмент имеет больший коэффициент теплопроводности по сравнению с остальными компонентами покрытия. В диапазоне оптимальной степени наполнения покрытия коэффициент теплопроводности изменяется не значительно.

С увеличением ОКП до 56% степень блеска композиционного теплоизоляционного материала возрастает, после чего значительно падает. Это обусловлено повышением шероховатости и пористости поверхности покрытия при степени наполнения близкой и большей критического значения. Увеличение доли алюминиевого пигмента приводит к повышению степени блеска. Частицы алюминия ориентируются параллельно поверхности, отражают световое излучение, тем самым увеличивая глянец покрытия.

Таким образом, можно сделать вывод, что коэффициент теплопроводности и степень блеска имеют обратный характер зависимости от компонентного состава. Для получения композиционного материала с наилучшими теплоизоляционными и эксплуатационными свойствами необходимо найти баланс между двумя этими характеристиками.

В диапазоне степени наполнения от 55 до 57% и содержании алюминиевой пигментной пасты 15-16% обеспечивается коэффициент теплопроводности композиционного материала 0,65-0,68 Вт/м·К, что ниже, чем

у аналогов, при этом достигается степень блеска 37-38 единиц, что позволяет перевести покрытие в категорию полуглянцевое.

На основании полученных зависимостей определен оптимальный состав композиционного теплоизоляционного покрытия (таблица 3), свойства которого представлены в таблице 4.

Таблица 3

Состав композиционного теплоизоляционного материала, на 1 кг

№ п.п.	Наименование компонента	Содержание, г
1	Стирол-акриловая дисперсия	613-630
2	Алюмосиликатные микросферы	157-169
3	Алюминиевая пигментная паста	150-160
4	Вода	61-63

Таблица 4

Свойства композиционного теплоизоляционного материала

№ п/п	Наименование показателя	Значение
1	Плотность покрытия, кг/м ³	800
2	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	0,065-0,68
3	Степень блеска, единицы	37-38
4	Время высыхания до степени 3 при Т (20±2)°С, ч	0,5
5	Укрывистость, г/м ²	239
6	Условная вязкость при температуре (20,0 ± 0,5) °С по вискозиметру ВЗ-246 диаметром сопла 4 мм, с, не менее	35
7	Адгезия покрытия, МПа: - к металлу; - к бетону, к кирпичной кладке	0,76 0,88
8	Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)	0,012

В четвертой главе диссертационного исследования выполнено сравнение экономической и теплотехнической эффективности композиционного теплоизоляционного покрытия на основе полых алюмосиликатных микросфер, алюминиевого пигмента и стирол-акриловой дисперсии по сравнению с аналогами.

Расчетная стоимость сырьевых материалов для производства 1 кг композиционного теплоизоляционного материала в ценах 2018 г. составляет 111 руб. С учетом рентабельности рыночная стоимость не будет превышать 300 руб. за 1 кг. Цена на ближайший аналог варьируется от 420 до 460 руб.

Установлено, что ближайший аналог имеет коэффициент теплопроводности – 0,073 Вт/м·К, что на 9% выше, чем у композиционного теплоизоляционного покрытия на основе полых алюмосиликатных микросфер и алюминиевого пигмента.

Приведены результаты натуральных испытаний композиционных теплоизоляционных покрытий в условиях строительного объекта, подтверждающие более высокую эффективность разработанного материала. Теплоизоляционные покрытия наносились методом лакокрасочной технологии на внутреннюю однослойную кирпичную стену. В процессе эксперимента фиксировались: температуры поверхностей ограждающей конструкции, температура воздуха в помещении и плотность проходящего теплового потока.

В результате эксперимента установлено, что при нанесении композиционного теплоизоляционного покрытия на основе алюмосиликатных микросфер и алюминиевого пигмента на внутреннюю поверхность ограждающей конструкции происходит снижение плотности проходящего теплового потока на 42%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен комплексный анализ особенностей структуры и свойств тонкослойных композиционных теплоизоляционных материалов. Методологически обоснована целесообразность использования в составе композиционного теплоизоляционного материала для декоративной отделки помещений наполнителя – полых алюмосиликатных микросфер и декоративного компонента – алюминиевого пигмента.

2. Обоснована возможность получения композиционного теплоизоляционного материала для декоративной отделки помещений на основе полых алюмосиликатных микросфер, алюминиевой пигментной пасты и водной дисперсии полимера.

На основании метода критической объемной концентрации пигментов и наполнителей изучено влияние состава композиционного теплоизоляционного материала на его свойства. Установлено, что максимально плотная упаковка компонентом пленки композиционного теплоизоляционного материала достигается при степени наполнения 59%. Получены количественные зависимости изменения свойств композиционного теплоизоляционного материала от состава. Определено, что наилучшие свойства покрытия достигаются в диапазоне ОКП 54-62%.

3. С помощью растровой электронной микроскопии исследовано влияние степени наполнения композиционного теплоизоляционного материала на структуру покрытия на его основе. Установлено, что при степени наполнения покрытия значительно меньшей, чем КОКП, зерна микросферического наполнителя значительно раздвинуты полимерной матрицей, которая имеет некоторое количество пор. При ОКП близкой к критической пространство между микросферическим наполнителем полностью заполнено полимером, который имеет достаточно плотную структуру без пор и пустот. При степени наполнения больше, чем КОКП, наблюдается разрыхление структуры полимера вблизи частиц наполнителя, а дальнейшее увеличение ОКП приводит к тому, что полимерного компонента уже недостаточно, чтобы заполнить все пространство между микросферами, структура покрытия рыхлая с большим количеством пор и пустот.

4. Установлены закономерности комплексного влияния компонентов теплоизоляционного материала на его коэффициент теплопроводности и степень блеска покрытия на его основе. Получены многофакторные математические модели, позволяющие прогнозировать коэффициент теплопроводности и степень блеска композиционного теплоизоляционного материала. Определен оптимальный состав композиционного теплоизоляционного материала, содержащий следующие компоненты, % по

массе: стирол-акриловая дисперсия – 61,3-63,0%; полые алюмосиликатные микросферы – 15,7-16,9%; алюминиевая пигментная паста – 15-16%; вода – 6,1-6,3%. Плотность покрытия на основе данного состава составляет 800 кг/м³, укрывистость – 239 г/м², адгезионная прочность не менее 0,76 МПа, паропроницаемость – 0,012 мг/(м·ч·Па), степень блеска 37-38 единиц, коэффициент теплопроводности 0,065-0,068 Вт/м·К.

5. На основании выполненных исследований, предложен состав композиционного теплоизоляционного материала стоимостью 230-250 руб., при стоимости ближайшего аналога 420-460 руб. за 1 кг. Композиционный теплоизоляционный материал применялся для отделки наружных стен в помещениях Административно-торгового комплекса по ул. Харьковская-Одесская, г. Тюмень и мауэрлата в мансардной кровле домов на объекте «Совмещенная малоэтажная застройка п. Винзили Тюменского района, ул. 60 лет Октября». Экономический эффект достигается не только за счет низкой стоимости композиционного теплоизоляционного материала, но и за счет отсутствия необходимости дополнительной декоративной отделки стены и высокой стойкости покрытия к загрязнению.

Принятые обозначения:

К – ОКП – объемная концентрация пигментов и наполнителей, определяемая как отношение суммарного объема пигмента и наполнителя к общему объему отвержденной пленки; КОКП – критическая объемная концентрация пигментов и наполнителей, при которой достигается максимально плотная упаковка частиц пигмента и наполнителя, пространство между которыми заполнено пленкообразователем; Д - стирол-акриловая дисперсия; А – алюминиевая пигментная паста; М – алюмосиликатные микросферы; В – вода; П₀ – общая пористость; Н₀ – нулевая гипотеза; Н₁ – альтернативная гипотеза; R² – коэффициент детерминации; F – критерий Фишера; F_{факт} – фактическое значение критерия Фишера; F_{табл} – табличное (критическое) значение критерия Фишера; k₁ – число степеней свободы большей дисперсии; k₂ – число степеней свободы меньшей дисперсии; m – число коэффициентов при независимой переменной; n – число измерений; α – уровень значимости; D – укрывистость; σ – адгезионная прочность; μ – коэффициент паропроницаемости; λ - коэффициент теплопроводности; Б – степень блеска

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ Статьи в журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:

1 Панченко, Ю.Ф. Повышение эффективности и долговечности ограждающих конструкций с применением новых теплоизолирующих материалов / Ю.Ф. Панченко, Г.А. Зимакова, Д.А. Панченко // Приволжский научный журнал. – Н. Новгород: ННГАСУ – 2010. - № 1. - С. 34-38.

2 Панченко, Ю.Ф. Энергоэффективность использования нового теплозащитного материала для снижения теплопотребления зданий и сооружений / Ю.Ф. Панченко, Г.А. Зимакова, Д.А. Панченко // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – Томск: ТГАСУ – 2011. - № 4. - С. 97-106.

3 Панченко, Ю.Ф. Теплоизолирующее покрытие на основе жидкой фольги и полых микросфер / Ю.Ф. Панченко, Г.А. Зимакова, О.А. Степанов, Д.А. Панченко // Строительные материалы. – 2012. - №8. - С. 83-85.

4 Акулова, М.В. Влияние комплексного наполнителя на свойства лакокрасочного теплоизоляционного покрытия / М.В. Акулова, Г.А. Зимакова, Ю.Ф. Панченко, Д.А. Панченко // Вестник гражданских инженеров. – СПбГАСУ – 2017. - №1. – С. 167-171.

Статьи в изданиях, индексируемых в базе Scopus и Web of Science:

5. Panchenko, Y. Thermal insulation coating based on water-based polymer dispersion / Y. Panchenko, M. Akulova, D. Panchenko // *MATEC Web of Conferences, IV International Young Researchers Conference «Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospect» (YSSIP-2017)*, 2018, vol. 143. Available at: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201714302007>

Статьи в научных журналах, сборниках и других изданиях:

6. Зимакова, Г.А. Перспективные направления разработки теплоизолирующих покрытий / Г.А. Зимакова, Ю.Ф. Лазарева (Ю.Ф. Панченко) // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири». Тюмень: ИПЦ «Экспресс». - 2006. – С. 29-31.

7. Зимакова, Г.А. Основные решения по разработке состава теплоотражающего материала / Г.А. Зимакова, Ю.Ф. Лазарева (Ю.Ф. Панченко) // Сборник материалов X международной научно-технической конференции «Проблемы строительного комплекса России». Том 1. - Уфа. 2006. – С. 160-161.

8. Зимакова, Г.А. Энергосберегающие материалы на основе жидкой фольги и микросфер / Г.А. Зимакова, Ю.Ф. Лазарева (Ю.Ф. Панченко) // Материалы международной научно-практической конференции «Строительство - 2006». – Ростов-на-Дону, 2006. – С. 31-33.

9. Пат. 63389 U 1 Российская Федерация: МПК⁵¹ E04B 7/00. Теплоизоляционный многослойный пакет / Г.А. Зимакова; Ю.Ф. Панченко и др. // заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Тюменский государственный архитектурно-строительный университет. - №2006145925/22; заявл. 25.12.06; опубл. 27.05.07. Бюл. № 15. – 3 с.

10. Панченко, Ю.Ф. Экспериментальные исследования теплозащитных характеристик теплоотражающих покрытий / Ю.Ф. Панченко, Д.А. Панченко // Материалы Всероссийской конференции «Строительное материаловедение сегодня: актуальные проблемы и перспективы развития». – г. Челябинск, Типография «PrintLine» - 2010. – С. 84-85.

11. Панченко, Ю.Ф. Особенности процессов теплопередачи через ограждающие конструкции с теплоотражающими покрытиями / Ю.Ф. Панченко, О.А. Степанов, Г.А. Зимакова, Д.А. Панченко // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2011» Том 30. Искусствоведение, архитектура и строительство. – Одесса: Черноморье, 2011. - С. 32-36.

12. Панченко, Ю.Ф. Влияние степени наполнения на структуру пленки лакокрасочного теплоизоляционного покрытия / Ю.Ф. Панченко // Сборник статей IV Международной научно-практической конференции: «Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации». В 2 ч. Ч. 1. – Пенза: МЦНС «Наука и просвещение», 2018. – С. 84-86.